江西瑞昌石灰岩山地淡竹林植物元素分布与吸收特征[1]

王光如[1,2]，冯火炬[3]，樊　燕[1]，王龙凤[1]，施建敏[1,2*]

（1．江西农业大学林学院，南昌 330045；2．江西省竹子种质资源与利用重点实验室，南昌 330045；3.江西省瑞昌市林业局，江西 瑞昌 332200）

摘　要：为探究石灰岩山地淡竹林植物养分分布与吸收特征，辨析其与群落功能地位的关系，本研究通过测定江西瑞昌石灰岩山地淡竹林建群种淡竹（*Phyllostachys glauca*），伴生种胡颓子（*Elaeagnus pungens*）、油茶（*Camellia oleifera*）和枸骨（*Ilex cornuta*）不同器官 9 种元素含量，对比分析了元素分布与吸收特征，结果表明：（1）淡竹各器官大量元素（N、P、K、Ca、Mg）分布规律为叶＞根＞茎，微量元素（Fe、Mn、Zn、Cu）分布规律为根＞叶＞茎；其叶中 N [(2 ± 1.16) g • kg^{-1}]、P [(1.17 ± 0.19) g • kg^{-1}]、Fe [(1.01 ± 0.09) g • kg^{-1}]元素含量高；各器官的元素生物吸收系数大小顺序与元素含量一致；（2）伴生种植物大量元素分布与生物吸收系数顺序均为：叶＞茎＞根。微量元素在器官的分布顺序因物种而异，油茶叶的 Mn 含量最高[(1.88 ± 0.18) g • kg^{-1}]，而 Ca、Mg、Zn 元素在枸骨茎中富集最多；（3）群落上层植物淡竹和光照条件较好的胡颓子各元素含量及分配规律相近，林下植物油茶和山胡椒元素含量相差较大。研究认为，淡竹林建群种和伴生种在元素分布和吸收特征的差异与群落光照条件密切相关。

关键词：淡竹，器官，光照，生物吸收系数，群落，分布格局

中图分类号：Q948　　　　文献标识码：A

DOI：10.11931/guihaia.gxzw201805056

Elements distribution pattern in *Phyllostachys glauca* forest and plant absorption traits in a limestone mountain of Ruichang, Jiangxi Province

WANG Guangru[1,2], FENG Huoju[3], FAN Yan[1], WANG Longfeng[1], SHI Jianmin[1,2*]

（1. *College of Forestry, Jiangxi Agricultural University,* 330045, Nanchang, China;

2. *Jiangxi Provincial Key Laboratory for Bamboo Germplasm Resources and Utilization,* 330045, Nanchang, China; 3. *Ruichang Bureau of Forestry,* 332200, Ruichang, Jiangxi, China）

Abstract: In order to explore element distribution pattern in *Phyllostachys glauca* forest and plant absorption traits in a limestone mountain, distinguish the relationships between them and the community, four plant species including one constructive species *Ph.glauca*, three auxiliary species *Elaeagnus pungens, Camellia oleifera* and *Ilex cornuta* were sampled in limestone mountain in Ruichang city of Jiangxi Province, China. Nine mineral elements were determined for

---

收稿日期：2018-05-24

基金项目：国家自然科学基金（31260174、31660198）；江西省自然科学基金（20161BBF60082）[Supported by Natural Science Foundation of China (31260174, 31660198)；Natural Science Foundation of Jiangxi province (20161BBF60082)]。

作者简介：王光如（1995—），女，江西省上饶人，硕士研究生，主要从事植物生态学研究，（E-mail）1984178893@qq.com。

***通信作者：**施建敏，博士，男，副教授，主要从事植物生理生态学研究，（E-mail） edulis@163.com。

all plant samples. After analyzing the element distribution differences and absorption trait among different species and organs, the results showed that: 1) In *Ph.glauca*, Macro nutrient enriched in leaves, then roots, and finally the stems; whereas the order of micro nutrients concentration is root, leaf and stem. The concentration of N [(18.82 ± 1.16) g • kg^{-1}]、P [(1.17 ± 0.19) g • kg^{-1}]、Fe [(1.01 ± 0.09) g • kg^{-1}] is the highest in leaf; and the rule of uptake traits are consistent with elements distribution pattern. 2) The element distribution pattern in auxiliary species and uptake traits shared same order, leaf >stem >root. The order of microelements concentration in organs have some differences in three auxiliary species. The Mn concentration of *C. oleifera* leaf is the highest in the three species, while Ca、Mg、Zn are accumulated most in the stems of *I. cornuta*. 3) Element concentration and distribution pattern of upper layer plants *Ph.glauca* and *E. pungens* which receive more light are similar, which different from that of the sublayer plant *C. oleifera* and *I. cornuta*. The study shows the differences in the distribution and absorption characteristics of the dominant species and associated species in limestone mountain were closely related to the community light conditions.

Keywords: *Phyllostachys glauca*, organs, illumination, element uptake traits, community, distribution pattern

石灰岩生境裸岩率高，土层浅薄，持水能力低，且土壤富含钙镁，植物较难生长(刘丛强等，2009；王惠等，2013)，其生态系统一旦被破坏，恢复异常困难(宋同清等，2014；郭柯等，2011；姜培坤等，2007)。对此，不少研究者开展了岩石、土壤、植物的养分研究，尝试揭示石灰岩地区生态系统的养分元素从母岩—土壤—植物的迁聚规律，和植物的养分吸收特性(杨成等，2007；曾昭霞等，2015；宁晓波等，2009)，为石灰岩地区的植被恢复和管理提供了理论指导。

然而，现有对石灰岩植物养分研究多集中在物种水平，且以叶片元素含量来表征植物元素含量(管东生等，2013；刘宏伟等，2014；杨慧等，2015；罗绪强等，2014)，这不但使研究结果与实际有偏差而且无法细察植物不同器官的养分吸收和分配特性，以致于难以指导更具体的植被管理措施。另一方面，在植物群落里，物种养分分布具有层次差异。李志安等(1999)对黄果厚壳桂群落植物元素含量特征研究发现不同层次植物养分含量具有差异性，上层种叶中 P 含量高于下层种，上层植物茎 N、P、K 含量明显比下层植物茎养分含量低。研究认为，植物养分的吸收、分配和利用差异是对环境适应的体现(Inteadad & Agren, 1988; Lalith et al, 2012)。故从群落水平开展植物养分的研究，可以深入认知植物养分吸收、分布特性与群落组织构建的内在关系。

为此，本研究选取赣西北石灰岩山地淡竹林为研究对象，通过测定、分析竹林土壤，竹林不同功能组分物种(建群种淡竹*Phyllostachys glauca*，伴生种胡颓子*Elaeagnus pungens*、油茶*Camellia oleifera*、枸骨*Ilex cornuta*)器官的元素含量，旨在揭示：(1)淡竹林植物元素器官分布与吸收特征；(2)淡竹林物种养分分布与其群落功能地位的关系。研究以期增进人们对石灰岩植物养分分布和吸收特性的认识，为石灰岩山地淡竹林的管理及恢复提供理论依据。

1 研究地区与方法

1.1 研究区域概况

瑞昌市位于江西省西北部，北临长江与湖北省交界。地理位置为29°23'—29°51'N， 115°06' — 115°44'E，幕阜山余脉自西向东绵延全境，地形多为低山、丘陵。瑞昌市为中亚热带北缘湿润性季风气候，年均气温 16.6 ℃，极端最高气温 41.2 ℃，极端最低气温-13.4 ℃，年均降雨量 1 394 mm，年均日照时数 1 890 h，无霜期为 260 d(刘苑秋等，2011)。瑞昌市有

大面积土地为石灰岩山地，因其水土流失严重，大多物种在该生境下难以生存。但淡竹却在该地大范围生长并成为优势种。

1.2 样品采集与测定方法

2014 年 10 月在研究区典型的石灰岩山地淡竹林中随机选择 3 个林分，每个林分相隔 50 m 以上。在每个林分中随机选取建群种淡竹，伴生种胡颓子、油茶、枸骨各 3 株。采用全株收获法对样株进行收获，伴生植物按叶、茎、根区分采样；建群种淡竹的收获参照樊燕等(2016)的取样方法，根为兜根和鞭根的混合样，竹叶、竹枝和竹秆因生物量大，采用部分取样法，具体为：从四个方位，上下冠层选择枝条，采集枝条上所有叶片为叶混合样，枝所采枝条的混合样，竹秆为纵劈一半的混合样。为便于物种间比较，将淡竹的枝、秆、鞭合并为“茎”，其元素含量依据淡竹各构件生物量比例(樊燕等，2016)用权重法计算而得。

土壤样品采集在每个取样林分按坡位分上、中、下 3 个区域用对角线法进行土钻取样，每个区域取 3 个点并为一个混合样，取样深度为 0~30 cm。土壤带回实验室后风干、清除杂质后过 100 目筛备用。植物样品带回实验室清洗干净，在 105 ℃下杀青 5 min，然后在 80 ℃烘干至恒重，粉碎研磨备用。样品的全 N 含量用半微量凯氏法测定；样品的 P、K、Ca、Mg、Fe、Mn、Cu 和 Zn 的含量采用 ICP-MS 法测定(Agilent 7700，美国安捷伦公司)测定，相对标准偏差(RSD)小于 5%。采用 EXCEL 2010 处理实验数据。

生物吸收系数（***A***）：植物从环境中吸收和积累化学元素的能力用生物吸收系数来表示，其计算公式为(宁晓波等，2009)：

$$A = (Cp / Cn) \times 100$$

式中：A 为生物吸收系数，Cp 为植物体内某元素含量，Cn 为土层元素含量。

2 结果与分析

2.1 元素含量特征

2.1.1 大量元素含量

淡竹、胡颓子、油茶和枸骨四种植物的 N 含量均以叶最高，其中淡竹和胡颓子叶 N 含量相似，分别为[(18.82 ± 1.16) g • kg^{-1}]和[(18.96 ± 1.38) g • kg^{-1}]，而油茶叶 N 含量最低，仅为[(8.97 ± 0.85) g • kg^{-1}]；四种植物根的 N 含量低，在[(4.14 ± 0.62 ~ 4.9 ± 0.43) g • kg^{-1}]之间，不及叶 N 含量的一半(图 1：A)；与胡颓子、油茶、枸骨器官的 N 含量规律（叶＞茎＞根）不同，淡竹茎的 N 含量是所有器官中最低的，仅为[(2.86 ± 0.49) g • kg^{-1}]。

淡竹林四种植物叶 P 含量高，但油茶叶的 P 含量为四种植物中最低[(0.66 ± 0.15) g •kg^{-1}]且小于其茎 P 含量[(0.84 ± 0.18) g • kg^{-1}]；除油茶外，其它 3 种植物不同器官 P 含量的分布规律为叶＞根＞茎，油茶则为茎＞叶＞根(图 1：B)。就器官 K 含量分布而言，四种植物均在茎中含量最低；淡竹、胡颓子、枸骨 K 含量均在叶中最高，但油茶叶 K 含量只有[(4.63 ± 0.64) g • kg^{-1}]，低于其根的 K 含量[(7.41 ± 1.29) g • kg^{-1}](图 1：C)。

淡竹、胡颓子、油茶 Mg 含量最高的器官为叶，分布规律均为叶＞根＞茎。但枸骨在茎中 Mg 含量最高[(2.96 ± 0.68) g •kg^{-1}]，其叶和根的 Mg 含量分别为[(2.75 ± 0.52) g •kg^{-1}]、[(2.43 ± 0.42) g • kg^{-1}](图 1：D)。淡竹 Ca 含量最低的为茎，仅[(0.31 ± 0.05) g • kg^{-1}]；淡竹和胡颓子 Ca 含量分布规律相同，为叶＞根＞茎。淡竹、胡颓子、油茶叶 Ca 含量最高，枸骨茎中 Ca 含量为四种植物所有器官中最高[(29.86 ± 3.49) g •kg^{-1}]]且高于其叶 Ca 含量[(17.62 ± 2) g • kg^{-1}]；不仅如此，枸骨器官 Ca 含量均高于其他 3 种植物对应器官含量(图 1：E)。

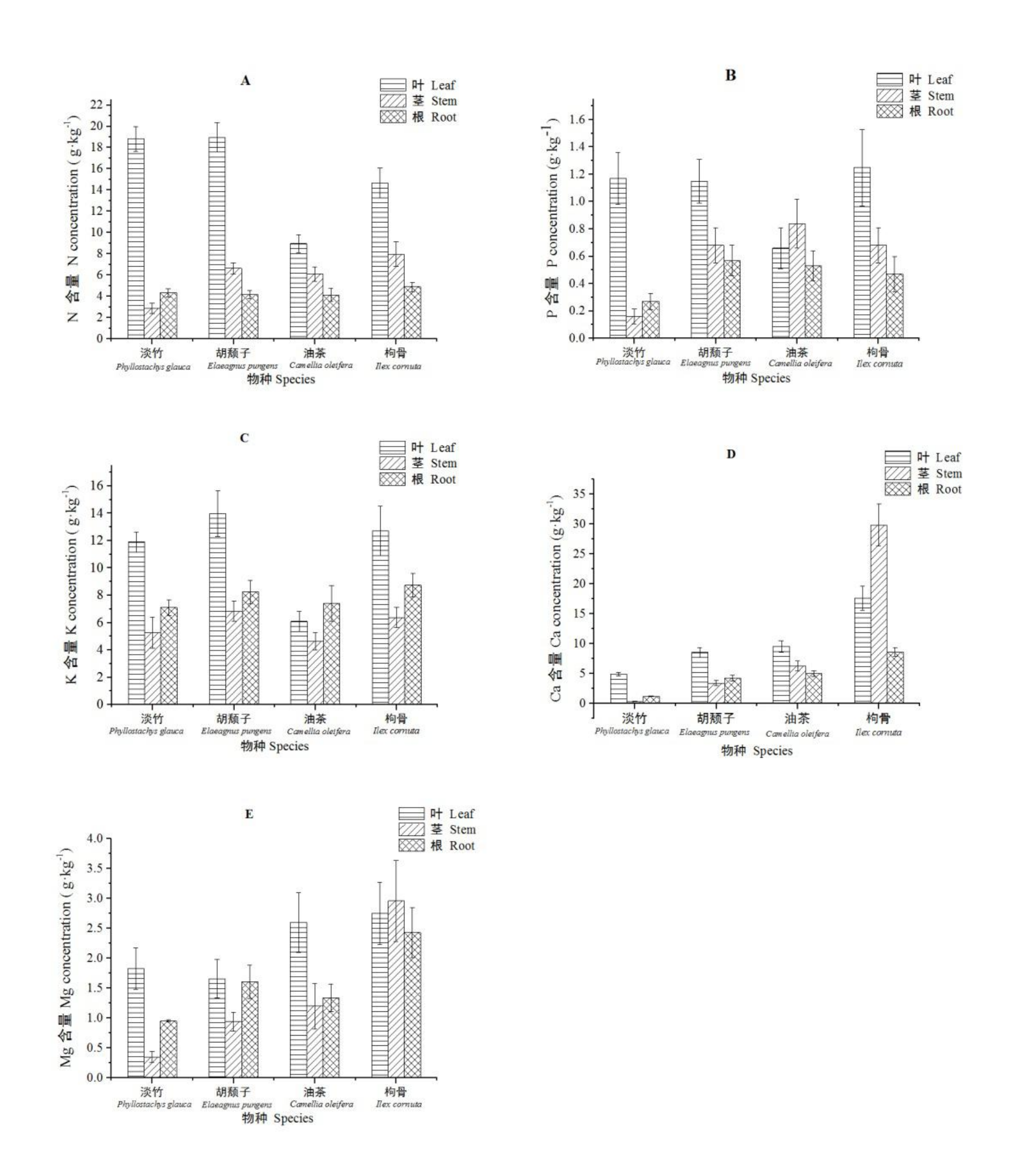


图 1 石灰岩山地淡竹林植物不同器官大量元素含量比较

Fig.1 The comparison of macroelement concentration in different species and organs of *Phyllostachys glauca* forest in limestone mountain

2.1.2 微量元素含量

胡颓子、油茶和构骨三种植物的 Fe 含量分布规律为根＞茎＞叶，淡竹也以根最高[(2.62 ± 0.56) g·kg^{-1}]，但其茎 Fe 含量[(0.14 ± 0.026) g·kg^{-1}]极低且低于叶中 Fe 含量[(1.01 ±0.09) g·kg^{-1}] (图 2：A)；就叶中 Fe 含量差异而言，淡竹分别为胡颓子、油茶、构骨的 2.24 倍、4.81 倍、4.59 倍。四种植物 Mn 含量均以叶最高，其中油茶叶 Mn 含量高达[(1.88 ± 0.18) g·kg^{-1}]；淡竹茎 Mn 含量[(0.03 ± 0.016) g·kg^{-1}]最低(图 2：B)。植物各器官 Zn 含量差异较大，其中构骨根 Zn 含量最高，达[(392.97 ± 39.87) g·kg^{-1}]，叶 Zn 含量最低[(231.2 ± 17.33) g·kg^{-1}]，其它植物各器官 Zn 含量均在[(18.23 ± 1.18 ~ 36.82 ± 2.54) g·kg^{-1}]之间(图 2：C)。伴生种植物 Cu 含量以茎高，淡竹以根最高[(32.75 ± 7.38) g·kg^{-1}]且大于其茎 Cu 含量[(4.22 ± 0.8) g·kg^{-1}]；除淡竹外，其它三种植物 Cu 含量分布规律为茎＞叶＞根(图 2：D)。

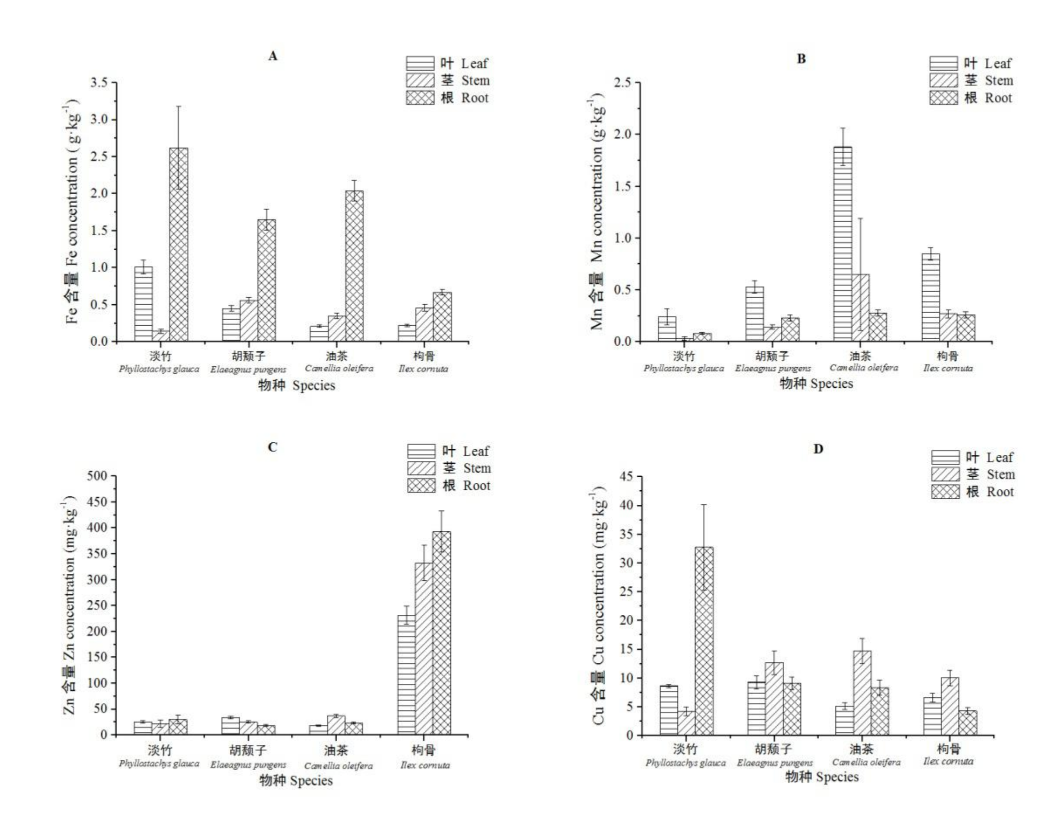


图 2 石灰岩山地淡竹林植物不同器官微量元素含量比较

Fig.2 The comparison of microelement concentration in different species and organs of *Phyllostachys glauca* forest in limestone mountain

2.2 元素吸收特征

从植物不同器官的元素生物吸收来看(表 1)：淡竹不同器官对大量元素(N、P、K、Ca、Mg)生物吸收系数顺序为叶＞根＞茎。其中，淡竹的叶对 N 生物吸收系数高达 780.02。胡颓子、油茶、枸骨不同器官对大量元素的生物吸收系数差异较大，但对 N 生物吸收系数规律均为叶＞茎＞根；淡竹林植物对 P 的生物吸收系数高的器官为叶，在枸骨中高达 300.37，但油茶以茎最高 202.65。除枸骨根中 K 生物吸收系数 32.80 最大外，淡竹、胡颓子、油茶 K 的生物吸收系数趋势为叶＞根＞茎。枸骨茎对 Ca 的生物吸收系数高达 1112.79 远高于其叶 Ca 生物吸收系数 656.76，而胡颓子、油茶各器官 Ca 吸收系数仅在 127.21~356.06 之间，淡竹茎 Ca 吸收系数低至 11.60。淡竹、胡颓子、油茶对 Mg 的生物吸收系数规律为叶＞根＞茎，枸骨茎中 Mg 吸收系数最大为 49.92 且高于其叶 46.26。

与叶对大量元素生物吸收最强不同，4 种植物器官对微量元素的生物吸收以根或茎最强(表 1)。淡竹的叶 Fe 生物吸收系数最高为 2.11，其茎对 Fe 生物吸收系数最低 0.29；胡颓子、油茶、淡竹 Fe 生物吸收系数规律为根＞茎＞叶。淡竹、胡颓子、枸骨根的 Al 生物吸收系数大，油茶以叶最高为 7.88。Mn 的生物吸收系数以叶最高，油茶的叶 Mn 生物吸收高达 206.15。淡竹的根 Cu 生物吸收系数为所有植物器官中最高，达 81.88，其它植物 Cu 吸收系数规律为茎＞叶＞根。枸骨根 Zn 的吸收系数最高达 201.34，为其他植物相应器官 Zn 吸收系数的 10 倍以上，其它植物 Zn 吸收系数仅在 9.34~18.86 范围内。

表 1 植物不同器官的元素生物吸收系数

Table 1 The bio-absorption coefficient of plant organs

植物 Plants	器官 Organs	大量元素 Macroelement N	P	K	Ca	Mg	微量元素 Microelement Fe	Mn	Cu	Zn
淡竹	叶 Leaf	780.02	281.92	52.65	182.74	30.89	2.11	26.26	21.60	12.99
Phyllostachys	茎 Stem	118.69	38.81	23.30	11.60	5.81	0.29	2.48	10.55	11.36
glauca	根 Root	180.00	65.01	31.47	44.98	16.07	5.44	9.23	81.88	15.41
胡颓子	叶 Leaf	785.44	277.04	61.94	317.83	28.00	0.93	57.85	23.18	17.46
Elaeagnus	茎 Stem	275.13	164.58	30.28	127.21	15.83	1.17	15.69	31.75	12.98
pungens	根 Root	173.23	138.12	36.45	159.84	27.03	3.42	25.22	22.77	9.54
油茶	叶 Leaf	371.82	159.28	26.94	356.06	43.79	0.43	206.15	12.85	9.34
Camellia ol	茎 Stem	252.88	202.65	20.48	234.31	20.16	0.73	70.68	36.86	18.86
eifera	根 Root	171.54	128.80	32.80	186.58	22.63	4.24	30.29	20.87	12.07
枸骨	叶 Leaf	607.41	300.37	56.30	656.76	46.26	0.46	93.15	16.56	118.46
Ilex cornuta	茎 Stem	330.54	163.76	28.26	1112.79	49.92	0.96	29.26	25.14	170.12
	根 Root	202.89	113.21	38.72	320.68	40.93	1.39	28.80	10.81	201.34

3 讨论

3.1 淡竹林植物养分分布规律

叶片一般是养分浓度最高的器官，根与茎的养分浓度顺序因物种和元素不同存在差异。邓艳等(2008)对广西典型岩溶区 11 种优势种植物元素分布特征研究表明，养分分布特点为叶＞茎＞根。刘广路等(2010)对不同年龄毛竹营养器官主要养分元素分布研究发现，N、P、Ca、Mg 元素平均含量顺序为叶＞茎＞根，与此相似，石灰岩山地伴生种胡颓子、 油茶、枸骨不同器官的 N、P、K 含量也为叶＞茎＞根，但是建群种淡竹大量元素分布规律不同，根的含量比茎高，排序为叶＞根＞茎。齐泽民等(2004)对箭竹群落的养分研究也发现箭竹元素器官含量规律为叶＞根＞茎。

不同器官养分浓度高低与植物的生理生态功能密切相关，它是植物与环境之间相互作用的反映(莫江明等，2000)。从上述的分析来看，根、茎浓度的高低变化具有物种特异性，但本研究中淡竹根系养分浓度高于茎可能是其对环境适应的结果。对同研究区淡竹不同器官 P 含量的研究表明，生长在几无裸岩的连续土淡竹 P 含量高低顺序为叶＞茎＞根(数据待发表)。相对于土层深厚的连续土生境，淡竹在裸岩率高、土被少的石灰岩生境分配更多根(梁宽等，2017)，以增强水分和养分的截获或吸收，这可能是本研究中淡竹根养分浓度高于茎的生理原因。

微量元素在器官中的分布没有共性规律，其富集因元素和物种而异(宁晓波等，2009；贺金生等，1998)，本研究结果也证实了这一点。与大量元素在叶片中聚集不同，叶片微量元素含量普遍较低，刘秀坤等在对 8 种针阔叶树种的混交林植物元素分析也发现微量元素在叶中含量较少(刘秀坤等，1991)。除 Mn 外，建群种淡竹和胡颓子、油茶、枸骨等伴生种植物微量元素均主要集中分布在根、茎中，这与微量元素在各地鱼腥草中的分布规律一致(秦樊鑫等，2015)。植物对微量元素的吸收和分配差异较大，这与植物本身对微量元素的需求、耐受性和储存的部位有密切关系(常杰等，1995)。

3.2 养分分布与群落物种功能地位

植物各器官化学元素分布格局反映了植物从土壤中吸收和蓄积矿质养分的能力(刘鹏等，

2008）。李志安等（1999）研究发现黄果厚壳桂群落上层植物叶中 P 含量高于下层植物。与此相似，本研究中建群种淡竹位于群落顶层，伴生种油茶、枸骨和胡颓子位于群落下层。和伴生植物相比，淡竹叶 N、Fe 含量高于油茶和枸骨，淡竹的叶 P 含量高于油茶，与枸骨相当（图 1：B）。淡竹与伴生种的元素生物吸收特性的差异与此一致。

群落成层的一个主要结果是改变了群落内的光照强度（颉洪涛等，2017）。不同层次的植物养分含量与光合同化速率有明显差别（刘广全等，2001；管铭等，2014），不少养分元素，如N、P、Fe等均参与植物的光合作用，使得光合强的上层植物叶片的养分浓度高（李志安等，1999；马雪红等，2008）。纪倩倩（2014）研究发现植物N含量与光合作用同化速率密切相关，全光照下单位叶面积N含量最高，光利用率也最高。从淡竹林群落不同物种的元素分布规律来看，淡竹和胡颓子各器官不同元素含量相近，油茶和枸骨的元素含量与前两种植物相差很大。实际野外调查发现，建群种淡竹为上层种其光照条件最好，胡颓子主要分布在林窗和林缘位置，接受光照较强利于其进行光合作用，因此这两种植物不同器官元素含量相近，油茶和枸骨等伴生物种的叶以上相关元素含量低（图1），这与其在淡竹林群落中处于下层光照弱有关。养分在群落内成层分布特点的生理机制解释是，上层植物叶片光照强度大，温度高增加了叶片内部蒸气压，从而提高上层叶片的蒸腾速率，导致养分大量汇集并通过木质部向上运输（Lambers et al，2008）。

4 结论

（1）淡竹林植物的大量元素均以叶片浓度最高，伴生种茎的浓度高于根，而建群种淡竹根的养分浓度反而高于茎；养分在淡竹根中的增高与其对石灰岩生境的适应相关；淡竹与伴生种的元素吸收特性规律与浓度分布一致。微量元素分布规律在器官和物种间的差异大，其中油茶Mn含量高，枸骨不同器官中Ca、Mg、Zn含量均较高，这和物种的微量元素吸收特性有关。

（2）建群种淡竹的叶N、P、Fe元素含量比伴生种高，这与群落的光照分布一致。淡竹为群落上层种接受光照强，胡颓子主要分布与林窗和林缘，光照条件较好，这两种植物不同器官元素含量相近；而油茶和枸骨为下层种光照弱，元素含量相对较低。

参考文献：

CHANG J，GE Y, 1995. Studies on the interrelation absorption of the main nutrient elements in *Aneurolepidium Chinense* community [J]. Chin Bull Bot, (2) : 136-141. [常杰和葛滢, 1995. 羊草群落主要营养元素吸收相关性分析[J]. 植物学通报, (2):136-141.]

DENG Y, JIANG ZC, LAN FN, et al, 2008. Distribution characteristics of elements in soil-plant system in typical forest karst areas of Guangxi tropical subtropical [J]. Ecol Environ Sci, 3: 1140-1145. [邓艳, 蒋忠诚，蓝芙宁，等, 2008. 广西热带亚热带典型森林岩溶区土壤-植物系统元素分布特征[J]. 生态环境, 3: 1140-1145.]

FAN Y, LI ZY, FAN CF, et al，2014. Community species diversity of succession sequences of light bamboo forest in limestone mountainous areas [J]. Chin J Ecol, 33(12): 3238-3244. [樊燕，黎祖尧，范承芳，等, 2014. 石灰岩山地淡竹林演替序列的群落物种多样性[J]. 生态学杂志, 33(12): 3238-3244.]

FAN Y, GUO CL, FANG K, et al, 2016. Study on the main factors influencing the biomass distribution of dominant species of *Phyllostachys glauca* in limestone mountainous areas [J]. Guihaia, 36(10):1172-1178. [樊燕，郭春兰，方楷，等, 2016. 石灰岩山地优势种淡竹生物量分配的影响主因研究[J]. 广西植物, 36(10):1172-1178.]

GUAN DS，LUO L, 2003. Characteristics of chemical element content in leaves of tropical plants

in Hainan Province [J]. Forest Sci, (2): 28-32.[管东生和罗琳, 2003. 海南热带植物叶片化学元素含量特征. 林业科学, (2): 28-32.]

GUO K, LIU CC, DONG M, 2011. Ecological adaptability of karst plants and management of stony desertification in southwest China [J]. Chinese J Plant Ecol, 35(10): 991-999. [郭柯，刘长成，董鸣, 2011. 我国西南喀斯特植物生态适应性与石漠化治理[J]. 植物生态学报, 35(10): 991-999.]

GUAN M, JIN ZX, WANG Q, et al, 2014. Response of dominant species of secondary forest in Qiandao lake to different light environment [J]. Chinese J Applied Ecol, 25(6):1615-1622.[管铭, 金则新，王强，李月灵，左威, 2014. 千岛湖次生林优势种植物光合特性对不同光环境的响应[J]. 应用生态学报, 25(6):1615-1622.]

HE JS, CHEN WL, WANG QB, 1998. Chemical element content characteristics of dominant plants in the three gorges of the Yangtze River [J]. Acta Bot Sin, 40(5): 453-460. [贺金生，陈伟烈，王其兵. 1998. 长江三峡地区优势植物的化学元素含量特征[J]. 植物学报, 40(5): 453-460.]

HANS L, LC T. 2008(2). Stuart Chapin III. Plant Physiological Ecology [M]. Springer: 352.

INTEADAD T，AGREN G, 1988. Nutrient uptake and allocation at steady-state nutrition. Acta Fac Rerum Natur Univ Phy, 72, 450–459.

JIANG PK, XU QF, ZHOU GM, et al. 2007. Changes of soil nutrient and activated carbon content after afforestation of limestone barren mountain [J]. For Sci，43: 39-42. [姜培坤，徐秋芳，周国模，等, 2007. 石灰岩荒山造林后土壤养分与活性碳含量的变化[J]. 林业科学， 43(增): 39-42.]

JI QQ, 2014. Distribution of N, P content in leaves of 8 species of trees and shrubs in succession of evergreen broad-leaved forest of Tiantong and its relationship with photosynthetic ability [D]. Shanghai : East China Normal Univ. [纪倩倩. 2014. 天童常绿阔叶林演替系列 8 种乔灌木叶片 N、P 含量、分配及其与光合能力的关系[D]. 上海：华东师范大学.]

JIE HT, YU MK, CHENG XR, 2017. Effects of light intensity on nitrogen and phosphorus nutrient content distribution and restriction of 5 kinds of shade tolerant plants [J]. Chin J Plant Ecol, 41:559–569. [颉洪涛，虞木奎，成向荣, 2017. 光照强度变化对 5 种耐阴植物氮磷养分含量、分配以及限制状况的影响[J]. 植物生态学报, 41:559–569.]

LALITH DB, HANS L, MICHAEL R, et al, 2012. Growth, carboxylate exudates and nutrient dynamics in three herbaceous perennial plant species under low, moderate and high phosphorus supply. Plant Soil, 358, 105–117.

LIU XK, WANG QC, WANG ZQ, et al, 1991. Analysiss of nutrient elements in different organs in mixed forest [J]. J Northeast Forest Univ, (S1): 236-243. [刘秀坤，王庆成，王政权，等, 1991. 混交林各树种不同器官营养元素含量分析[J]. 东北林业大学学报, (S1): 236-243.]

LI ZA, WANG BS, KONG GH, et al, 1999. Characteristics of element content in the *Cryptocarya concinna* community of in monsoon evergreen broad-leaved forest of Dinghu mountain [J]. Chinese J Plant Ecol, 05: 411-417. [李志安，王伯荪，孔国辉，等, 1999. 鼎湖山季风常绿阔叶林黄果厚壳桂群落植物元素含量特征 [J]. 植物生态学报, 5: 411-417.]

LIU GQ, TU XN, NI WJ, 2001. The hierarchical distribution of main nutrient elements in *Quercus acutidentata* forest ecosystem [J]. Acta Bot Bor-Occid Sin, 21(2): 237-246. [刘广全，土小宁，倪文进, 2001. 锐齿栎森林生态系统主要营养元素的层次分布[J]. 西北植物学报, 21(2): 237-246.]

LIU P, HAO ZY, CHEN ZL, et al, 2008. The distribution of nutrient elements and their

relationship with soil nutrients in the organs of seven seed flowers in different *Heptacodium miconioides* community types [J]. Acta Pedol Sin, (2): 304-312. [刘鹏, 郝朝运, 陈子林, 等, 2008. 不同群落类型中七子花器官营养元素分布及其与土壤养分的关系[J]. 土壤学报, (2): 304-312.]

LIU CQ, LANG YC, LI SL, et al, 2009. Study on biogeochemical processes and material cycles in karst ecosystem: importance, status and trend [J]. Earth Sci Frontiers, 16(6): 1-11. [刘丛强, 郎赟超, 李思亮, 等, 2009. 喀斯特生态系统生物地球化学过程与物质循环研究: 重要性、现状与趋势[J]. 地学前缘, 16(6): 1-11.]

LIU GL, FAN SH, GUAN FY, et al. 2010. The distribution of main nutrient elements and their relationship with soil environment of *Phyllostachys heterocycla* nutritive organs at different ages [J]. Forest Res, (02): 252-258. [刘广路, 范少辉, 官凤英, 等, 2010. 不同年龄毛竹营养器官主要养分元素分布及与土壤环境的关系[J]. 林业科学研究, (02): 252-258.]

LIU YQ, WANG F, KE GQ, et al, 2011. Effects of returning farmland to forest in limestone mountainous area of Ruichang, Jiangxi Province on soil organic carbon [J]. Chinese J Applied Ecol, 22(4): 885-890. [刘苑秋, 王芳, 柯国庆, 等, 2011. 江西瑞昌石灰岩山区退耕还林对土壤有机碳的影响[J]. 应用生态学报, 22(4): 885-890.]

LI C, 2012. Effects of different N K levels on photosynthesis and growth of navel orange [D]. Chongqin : Southwest Univ. [李彩, 2012. 纽荷尔脐橙不同叶片 N、K 水平对光合及生长的影响[D]. 重庆:西南大学.]

LUO XQ, ZHANG GL, DU XL, et al, 2014. Elemental content and stoichiometric characteristics of common calcareous plants in Maolan karst forest [J]. Ecol Environ Sci, 23(7): 1121-1129. [罗绪强, 张桂玲, 杜雪莲, 等, 2014 . 茂兰喀斯特森林常见钙生植物叶片元素含量及其化学计量学特征[J]. 生态环境学报, 23(7): 1121-1129.]

LIU HW, WANG W, ZUO J, et al, 2014. Leaf characters of 30 main plants in limestone mountainous area of middle Liangshan [J]. J Southwest normal Univ (natural science edition), (9): 50-55. [刘宏伟, 王微, 左娟, 等, 2014. 中梁山石灰岩山地 30 种主要植物叶片性状研究. 西南师范大学学报(自然科学版), (9): 50-55.]

LI YH, YANG Y, ZHANG Y, 2016. Analysis on the content of mineral elements in the organs of red olive plum and olive plum of mangrove plants in Tielu port [J]. Wetland Sci, 03: 433-438. [李燕华, 杨勇, 张颖, 2016. 铁炉港红树植物红榄李和榄李各器官矿质元素含量分析[J]. 湿地科学, 03: 433-438.]

LIANG K, FAN Y, BU WS, et al, 2017. Phenotypic Plasticity of A Dominant Bamboo Species (*Phyllostachys glauca*) in Limestone Mountain in Northwest of Jiangxi Province[J]. Acta Agricul Univ Jiangxi, 39(6): 1178-1186. 梁宽, 樊燕, 卜文圣, 等, 2017. 石灰岩山地优势种淡竹的表型可塑性研究[J]. 江西农业大学学报, 39(06): 1178-1186.

MO JM, ZHANG DQ, HUANG ZL, et al, 2000. Study on nutrient element distribution pattern of south Asian tropical evergreen broad-leaved forest in Dinghu mountain [J]. J tropical subtropi plants, (03): 198-206. [莫江明, 张德强, 黄忠良, 等, 2000. 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林植物营养元素含量分配格局研究[J]. 热带亚热带植物学报, (03): 198-206.]

MA XH, ZHOU ZC, ZHANG Y, et al, 2008. The relationship between foraging behavior and light condition of different species under heterogeneous nutrient environment [J]. Chin J Appl Ecol, 5: 961-968. [马雪红, 周志春, 张一, 等, 2008. 异质养分环境下不同树种觅养行为与光照条件的关系 [J]. 应用生态学报, 5: 961-968.]

MO FY, XI XS, CHEN ZJ, 2010. The migration of elements between rocks and soil and

vegetation - a case study of bama karst rock mountain area in Guangxi [J]. Carsolg Sinica, 29(4): 440-444. [莫源富，奚小双，陈忠将， 2010. 岩石-土壤-植被(红背山麻杆、裸花紫珠)间的元素迁移——以广西巴马岩溶石山地区为例 [J]. 中国岩溶, 29(4): 440-444.]

NIE DP, 1993. The biological cycle of nutrient elements in forest ecosystems [J]. Forest Res, 30(l): 34-42. [聂道平, 1993. 森林生态系统营养元素的生物循环[J]. 林业科学研究, 30(l): 34-42.]

NING XB, XIANG WH, FANG X, et al, 2009. Characteristics of the content of chemical elements in limestone soil and settled plants of limestone in Guiyang Huaxi [J]. Forest Sci,(5): 34-41. [宁晓波，向文化，方晰，等, 2009. 贵阳花溪石灰岩、石灰土与定居植物化学元素含量特征[J]. 林业科学, (5): 34-41.]

QI ZM, 2004. Study on the dynamics of soil nutrient source-bank in *Fargesia spathacea* community in western Sichuan [D]. Chongqing: Agricul Univ Southwest. [齐泽民. 2004. 川西亚高山箭竹群落——土壤养分源库动态研究[D]. 重庆：西南农业大学.]

QING FX， YANG Y, 2015. Distribution characteristics of different trace elements in different organs of *Geranium robertianum* plant [J]. Food Res Develop, 36(2): 10-14. [秦樊鑫， 杨昱, 2015. 不同微量元素在鱼腥草植株不同器官中的分布特征[J]. 食品研究与开发, 36(2): 10-14.]

SHENG ZK, YANG XG, XU WS, 1999. Regional differentiation of nutrient element circulation in major forest communities in China [J]. J Hubei Instit Nationalities (Natural Science Edition), 17(2):44-46. [沈作奎，杨新光，徐伟声, 1999. 中国主要森林群落营养元素循环的区域分异[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 17(2):44-46.]

SONG TQ, PENG WX, DU H, et al. 2014. The mechanism of spatiotemporal evolution and its regulation countermeasures of karst desertification in southwest China [J]. Acta Ecol Sinica, 34(18): 5328-5341.[宋同清，彭晚霞，杜虎，等, 2014. 中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、发生机制与调控对策[J]. 生态学报, 34(18): 5328-5341.]

WANG H，WANG SS, 2013. Soil organic carbon content and its influencing factors in vegetation succession in limestone mountainous areas [J]. J Northeast Forest Univ, 41(1): 91-95. [王惠，张珊珊, 2013. 石灰岩山地恢复植被演替中土壤有机碳质量分数及影响因素[J]. 东北林业大学学报, 41(1): 91-95.]

YANG YX, HE TR, WANG SY, et al, 2002. Study on biomass and seasonal dynamics of typical wetland ecosystem in Sanjiang plain [J]. Grassland China, 24(1): 1-7. [杨永兴，何太蓉，王世岩，等, 2002. 三江平原典型湿地生态系统生物量及其季节动态研究 [J]. 中国草地，24(1): 1-7.]

YANG C, LIU CQ, SONG ZL, et al, 2007. Characteristics of plant nutrient element content in karst mountainous area of Guizhou province [J]. Ecol Environ Sci, 2: 503-508. [杨成，刘丛强，宋照亮，等, 2007. 贵州喀斯特山区植物营养元素含量特征. 生态环境, 2: 503-508.]

YANG C, LIU CQ, SONG ZL, et al. Distribution characteristics of plant soil C N S in karst mountains of Guizhou province [J]. J Beijing Forest Univ, (1): 45-51. [杨成，刘丛强，宋照亮，等, 2008. 贵州喀斯特山区植物土壤 C、N、S 的分布特征. 北京林业大学学报, (1): 45-51.]

YANG H, LI QF, TU CY, et al, 2015. Stoichiometric characteristics of carbon nitrogen and phosphorus in the leaves of typical plants in the karst area of Maocun, Guilin [J]. Guihaia, 35(4):493-499. [杨慧，李青芳，涂春艳，等, 2015. 桂林毛村岩溶区典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征[J]. 广西植物, 35(4):493-499.]

ZENG SX, WANG KL, LIU XL, et al, 2015. Ecological stoichiometric characteristics of plant -

litter - soil in karst forest of northwest Guangxi [J]. Chinese Js Plant Ecol, (7): 682-693. [曾昭霞, 王克林, 刘孝利, 等, 2015. 桂西北喀斯特森林植物-凋落物-土壤生态化学计量特征[J]. 植物生态学报, (7): 682-693.]